

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108185

零中频架构的 CPFSK 弹载遥测发射机设计

马游春^{1,2} 李超杰^{1,2} 李晋芳^{1,2} 张琦琪^{1,2}

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对弹载遥测通信系统中频谱利用率低、设备体积大、可靠性差、设计复杂等问题,设计了一款采用高频谱利用率 CPFSK 调制方式的零中频遥测发射机。首先根据 CPFSK 调制方式将采编组帧后的 2 Mbit/s 遥测数据信号完成指数为 0.715 的正交调制,调制后的数据在 AD9364 芯片内部进行插值滤波、上边频等处理后,经过放大电路由天线发射出去。最后通过搭载测试系统,测试射频调制信号的频谱、传输距离和误码率。发现输出信号具有带宽窄、频谱主瓣能量集中、旁瓣衰减较快等优点,传输距离可达 20 km 以上。结果表明本设计的弹载遥测发射机具有体积小、复杂度低、可靠性高、频谱利用率高的特点,不仅满足弹载遥测系统的性能指标,还可应用于未来航天遥测遥控系统中。

关键词: CPFSK; AD9364; 零中频; 连续相位频移键控; 弹载遥测系统

中图分类号: TN914.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of CPFSK missile-borne telemetry transmitter based on zero if architecture

Ma Youchun^{1,2} Li Chaojie^{1,2} Li Jinfang^{1,2} Zhang Qiqi^{1,2}(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of low spectrum utilization, large equipment volume, poor reliability and complex design in missile borne telemetry communication system, designs a zero intermediate frequency telemetry transmitter with high spectrum utilization CPFSK (continuous phase frequency shift keying) modulation. Firstly, according to the CPFSK modulation mode, the framed 2 Mbit/s telemetry data signal is subjected to orthogonal modulation with an index of 0.715. The modulated data is processed by interpolation filtering and upper edge frequency within the AD9364 chip, and then transmitted by the antenna through the amplifier circuit. Finally, the spectrum, transmission distance and bit error rate of the radio frequency modulation signal are tested by the test system. It is found that the output signal has the advantages of narrow bandwidth, concentrated energy of the main lobe spectrum and faster attenuation of the sidelobe, and the transmission distance can reach more than 20 km. The results show that the designed missile-borne telemetry transmitter has the characteristics of small size, low complexity, high reliability and high spectrum utilization. It not only meets the performance index of missile-borne telemetry system, but also can be applied to future aerospace telemetry and remote control system.

Keywords: CPFSK; AD9364; the zero intermediate frequency; continuous phase frequency shift keying; missile-borne telemetry system

0 引言

软件无线电通信技术的快速发展推动了国防遥测技术的飞速进步,弹载遥测系统作为火箭弹武器重要组成部分之一,其测试数据为导弹及其分系统的设计、验证以及优化

提供了重要的数据依据^[1]。目前遥测系统的发展面临以下两个矛盾,一个是不断增长的遥测需求与有限的频谱资源之间的矛盾^[2],另一个是追求高稳定性与弹载遥测设备空间、供电等有限之间的矛盾。针对上述问题,文献[3]提出弹上遥测系统不断朝着小型化、标准化和模块化发展,并且

收稿日期:2021-10-25

给出一种小型化设计方案,但是文中没有对如何提高频谱利用率提出方案;文献[4]和文献[5]提出连续相位频移键控(continuous phase frequency shift keying, CPFSK)信号具有较高的频带利用率,相位连续并且兼具了FSK恒包络的特点,但是其基带调制部分过于复杂,不应用于弹载遥测系统。

针对上述问题,本文设计采用CPFSK的调制方式提高频谱利用率,节约频谱资源,提高发射能量利用率;利用高集成度的射频收发芯片AD9364器件^[6]搭建零中频架构的遥测发射系统。此系统具有体积小、复杂度低、可靠性高、频谱利用率高等特点。

1 CPFSK 信号特性分析

为了提高遥测发射机的频谱利用率、发射能量利用率,以及调制指数等参数的确定,需要对CPFSK信号特性进行理论分析。CPFSK是在码元发生突变时保持相位连续的一种调制方式,在理想条件下,载波频率会随着基带信号呈线性变化^[7],此时可以得到调频信号的时域表达式如式(1)所示。

$$S(t) = A \cos[2\pi f_c t + 2\pi \Delta f_d \int_{-\infty}^t m(t') dt + \theta_c] \quad (1)$$

其中, A 是载波的振幅, f_c 是载波的频率, θ_c 是载波的初始相位, Δf_d 是频偏因子。当 $m(t)$ 为归一化基带信号时, Δf_d 称为峰值频偏^[8], 令:

$$h = 2\Delta f_d T_b = (f_2 - f_1) T_b \quad (2)$$

式中: h 称为调制指数或者频移指数, T_b 为数字码元周期, f_1 和 f_2 代表两个不同的载波频率。

为了弄清两个频率之间的间隔关系,对两个波形进行相关系数的讨论,设CPFSK信号在一个码元期间内的载波为:

$$S(t) = \begin{cases} A \cos \omega_1 t, & 0 \leq t \leq T_b \\ A \cos \omega_2 t, & 0 \leq t \leq T_b \end{cases} \quad (3)$$

则这两个载波的相关系数为 $\rho = \frac{1}{E_B} \int_0^{T_b} s_1(t) s_2(t) dt$,

其中, $E_B = \int_0^{T_b} s_1^2(t) dt = \int_0^{T_b} s_2^2(t) dt$ 为一个码元的信号

能量。故 $\rho = \frac{\sin(\omega_2 - \omega_1) T_b}{(\omega_2 - \omega_1) T_b} + \frac{\sin 2(\omega_c) T_b}{2\omega_c T_b}$, 当选择

$2\omega_c T_b \gg 1$ 或者 $2\omega_c T_b = k\pi$, 这时相关系数可以简化为

$\rho = \frac{\sin(\omega_2 - \omega_1) T_b}{(\omega_2 - \omega_1) T_b}$, 当 $(\omega_2 - \omega_1) T_b = 1.43\pi$, 即

$h = 0.715$ 时, 这时两个信号的相关系数最小, 其值为 $\rho = -2\pi/3$, 即两个信号之间具有超正交特性。这样设计的信号进行解调, 在误码率一定条件下, 所需要的信号能量比 $\rho = 0$ 的正交信号还小^[9]。

2 设计原理与实现结构

本文的主要设计思路如图1所示,首先在MATLAB中完成2 Mbit/s连续数据和CPFSK的调制仿真设计,验证本调制方式正确性。其次在XILINX提供的ZYNQ-7000开发平台VIVADO和VITIS进行软件和硬件设计^[10],其中软件设计包括对AD9364进行数百个寄存器的初始化以及中心频率、带宽、衰减等相关寄存器的配置;硬件设计主要包括对2 Mbit/s遥测信号进行组帧处理、CPFSK调制和基带数据处理与AD9364的LVDS数据接口。然后使用VIVADO内部ILA IP核进行在线逻辑调试,完成设计的仿真验证。最后通过搭载遥测系统测试平台,验证所设计的发射机是否符合弹载遥测发射机的要求。

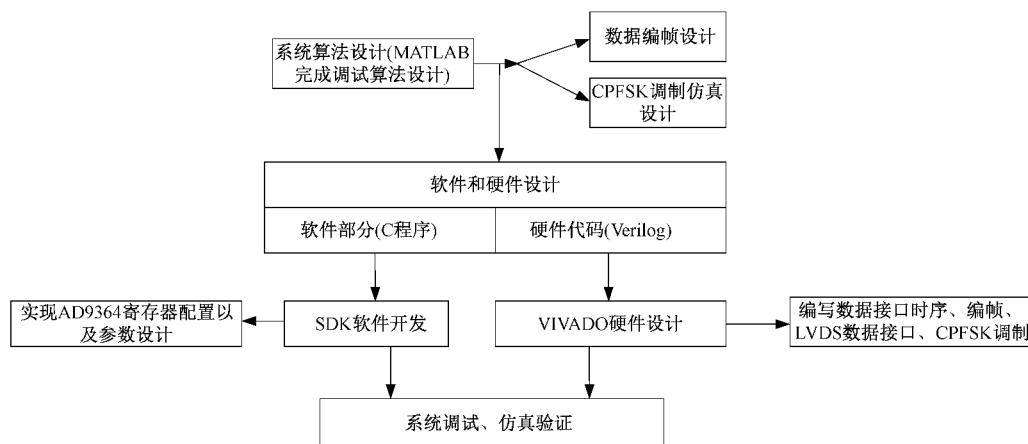


图1 遥测发射机设计流程

2.1 CPFSK 信号调制工程实现

根据第1节详细描述的CPFSK信号特征,数字频移键控是利用载波频率大小来实现数字信息的传输,在实际的调制过程中,由信号码元控制载波频率的大小,常见情况下,码元信号“1”对应一个低频载波,码元信号“0”对应

另一个高频载波。并且载波频率改变是在码元跳变的瞬间完成的,同时也要保持相位的连续。在设计中一般会采用ROM查找表法^[11]和DDS频率合成器^[12]。本设计采用基于ROM查找表法的CPFSK的调制,具体原理如图2所示。

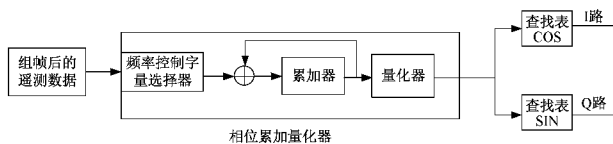


图 2 CPFSK 的调制原理

DDS 由相位累加器、量化器和查找表组成,因此在调制前需要得到载波频率控制字参数和正余弦波形文件。由输出频率 f_{out} 、频率控制字 W 、控制字位宽 N 和采样频率 f_s 他们之间的关系 $f_{out} = \frac{W}{2^N} \times f_s$, 可以计算出不同载波频率下的频率控制字^[13]。

查找表 ROM 内存放的正余弦波形可以通过 MATLAB 来获取,经过量化后可以生成两个 coe 文件。组帧后的 2 Mbit/s 遥测单比特数据进入 CPFSK 调制模块,首先进行判断遥测数据码元为“0”或者为“1”,根据不同的码元信号,可以计算出相应的频率控制字,在时钟的驱动下做相位累加,累加后的值在量化器中进行量化,量化器输出数据的位宽由 ROM 里面正余弦波形的深度决定,量化后的数据可以作为查找表里面的地址进行读数。

为了实现连续相位调制,在相位累加量化器中做出相应的设计,当码元发生突变时,由突变前的相位累加值直接加上跳变后的频率控制字,经量化器、查找表产生相应的 I、Q 信号后,通过 LVDS 接口进入到 AD9364 中。调制仿真如图 3 所示,输入信号经过调制后,得到 I、Q 两路数据,并且在码元跳变时,相位依旧保持连续,可以避免频谱泄露,实现 CPFSK 的调制。

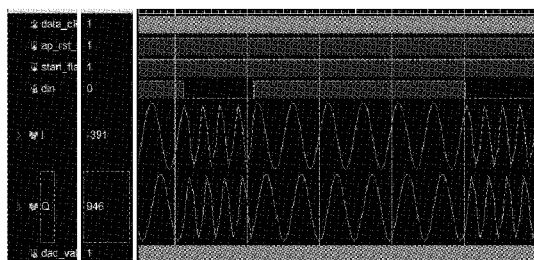


图 3 CPFSK 调制仿真波形

2.2 数据接口时序设计

CPFSK 遥测发射机分为基带信号的处理和射频信号的处理,两者之间依靠 LVDS 接口实现数据交互。如图 4 所示,数据时钟来源于 AD9364 外部晶振,通过配置内部的 PLL 寄存器参数产生 DATA_CLK 时钟,在 FPGA 内经时钟反馈产生 FB_CLK 用于数据传输时钟,由于采用 DDR 模式,数据为 I、Q 两路,此时时钟为采样时钟的两倍。射频部分依靠 AD9364 芯片来完成上变频、滤波等操作,因而在使用时,需要对内部上百个寄存器进行配置,为了更加方便地配置 AD9364 寄存器,选择使用 PS 端来进行寄存器配置^[14]。

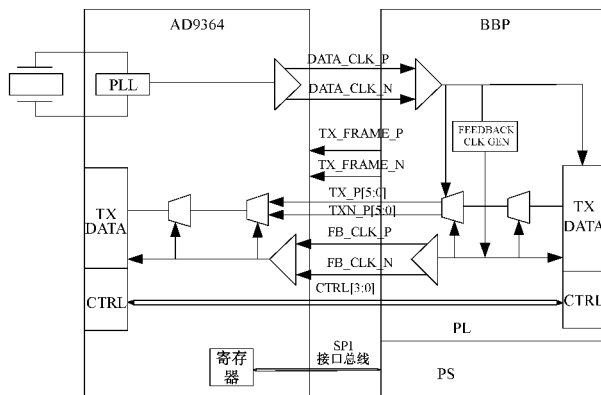


图 4 遥测发射机数据传输接口

为了提高基带信号与 AD9364 之间的传输速度,简化接口设计,本节重点解决数据传输接口的时序问题。AD9364 芯片数据接口支持 CMOS 接口和 LVDS 接口,同时不同的接口可以配置为单数据速率(SDR)和双数据速率(DDR)^[15]。为了提高数据的传输性能,本设计采用 DDR 模式下的 LVDS 数据接口。1R1T、LVDS 数据传输模式下,AD9364 与 FPGA 数据传输时序如图 5 所示,调制后的两路 12 位的数据需要调整为 I 路高 6 位、Q 路高 6 位、I 路低 6 位以及 Q 路低 6 位,并且在时钟采集 I、Q 高六位时, TX_FRAME_P 信号要满足为高电平;采集 I、Q 低六位时, TX_FRAME_P 信号要满足为低电平。

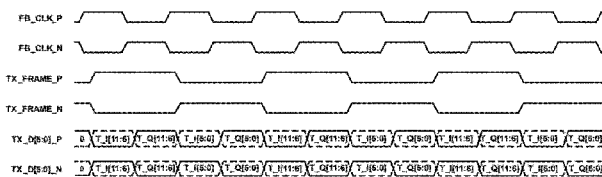


图 5 LVDS 数据传输时序图

在设计时序电路时,充分利用 XILINX 提供的原语,简化设计的难度, XILINX 生产的 7 系列 FPGA 在 OLOGIC 中有专用原语来实现 DDR 模式下的数据传输,通过实例化 ODDR 原语来实现此特性。如图 6 所示,当 OCE 信号为高电平时,在时钟的驱动下,两种模式都可以满足 AD9364 数据传输格式要求,但是为了避免时钟采集的冲突,同时减少程序书写过程产生的寄存器,充分利用 DDR 高速率模式,本设计采用 SAME_EDGE 模式,如图 6(b)所示。在 SAME_EDGE 模式下,时钟的上升沿和下降沿采集数据 D1 和 D2,同时输出 D1 和 D2。当满足数据传输格式后,需要考虑 TX_FRAME_P/N 信号,此信号为发射路径的标志信号,用来识别所传输的数据,为高时传输 I/Q 高位数据,为低时传输 I/Q 低位数据。此时需要实例化 IDELAYE2 来实现数据的可编程延迟,通过改变 CNTVALUEIN 输入信号的值来延迟数据输出时间,来满足一个 FB_CLK_P/N 时钟能够同时采集到 TX_FRAME_P/N 的高电平或者低电平,以此来保证数据传输的有效。

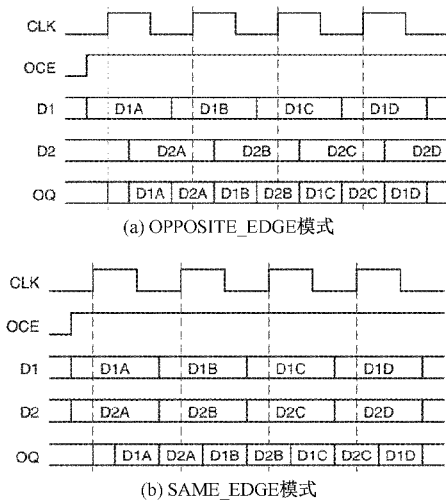


图 6 DDR 输出的两种模式

基带调制后的 I、Q 信号经 LVDS 数据接口进入到 AD9364 芯片,经 AD9364 内部的滤波器、DAC 和混频器后上变频至 2.260 GHz,完成后的模拟数据经过放大电路和天线发射出去。

3 系统测试与结果分析

遥测发射机的开发环境为 XILINX 的集成 EDA 工具 VIVADO 软件,数据由 FPGA 内部产生 0~255 的连续递增数,经过基带组帧、调制和射频处理后发射出来,地面接收站通过参数设置进行接收。测试环节分为两种,一种是遥测发射机的频谱测试,测试不同调制指数下实际的发射频谱,寻找实际的最优调制指数,最大化的利用发射能量和提高频带利用率;另一种是进行实际通信测试,搭载遥测发射与接收链路,验证在实际的信道传输中,发射机的工作性能以及相应的误码率等参数^[16]。

3.1 频谱分析

搭载频谱测试平台,为了防止损坏频谱分析仪,直接将 AD9364 输出外接 50 dB 的衰减器连接到频谱分析仪的输入端^[17],设置中心频率为 2.26 GHz,内部补偿 -50 dB,对 CPFSK 的调制指数为 0.5、0.715、1 和 1.5 分别进行频谱测试,频谱分析结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,当调制指数为 0.5 时,频谱上可以看出是一个单峰,并且主瓣比较集中,旁瓣衰落较快;调制指数为 0.715 时,频谱上大致和调制指数为 0.5 时一样,但是可以看出这时的频谱出现了两个高峰,此时两个峰之间的距离比较近。当调制指数为 1 和 1.5 时,频谱上可以明显看到两条双峰,并且随着调制指数的增加,双峰之间的距离也随之增加。

总体来说,CPFSK 的输出信号带宽窄、频谱主瓣能量集中、旁瓣衰减较快,频谱整体干净清晰,适合于功耗性能要求较高的弹载遥测系统。对于信号解调来说,实验发现当调制指数较小时,经过低通滤波等处理后的基带信号波形会出现明显的失真,以致影响判决输出后解调的性能,

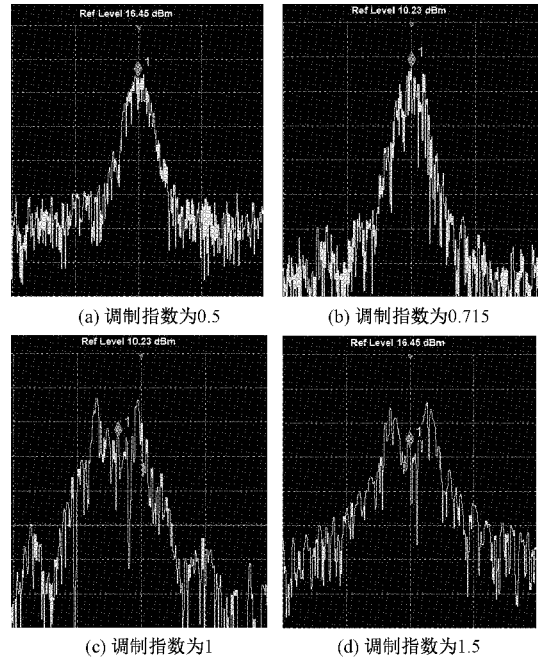


图 7 不同调制指数下的频谱图

但是此时主瓣比较集中,能量也比较集中,能够提高能量利用效率;当调制指数较大时,经过低通滤波等处理后的基带信号波形就比较规则,判决后解调的性能会有明显地提升,但是会出现双峰,单个能量为信号功率的 1/4,因而降低能量利用效率。

采用 CPFSK 调制方式的遥测发射系统在信号总功率上要比传统 FSK 信号总功率提高 6 dB 左右,并且调制指数为 0.715 的 CPFSK 信号能量更为集中。综合发射能量利用和接收解调性能等考虑,本设计采用调制指数为 0.715 来设计 CPFSK 遥测发射机,其中码速率为 2 Mbit/s,根据频偏,调制指数和码速率的关系,可以得到频偏为 1.43 MHz。

3.2 实物测试

将弹载遥测发射机搭载实际通信平台,接收机设置界面如图 8 所示,解调模式选择 PCM-FM,接收频率设置为 2 260 MHz,码速率设置为 2 Mbit/s,子帧长度设置为 64,码型为 NRZ-L,同步字设置为 0xEB90,同步字数设置为 16。确认设置后,给发射机上电,观测同步状态指示灯,当载波同步、位同步、子帧同步和副帧同步指示灯绿灯常亮,表明遥测通信链路正常,点击开始存盘数据按钮,遥测数据开始记录,接收机界面呈周期性波形表明发射机发射数据连续,无明显丢包。

打开接收到的原始遥测数据,设置行长度为 72,可以看到图 9(a),数据包包含帧头、时间、帧计数和发射的数据,其中 0C 和 0D 为帧计数,可以明显看出帧计数在不断地做累加。遥测数据经过解析软件解析后,得到图 9(b),设置行长度为 256,可以看到从 0 递增到 255 的遥测数据,验证遥测发射机发射的数据正常,重复多次试验,经解析后数

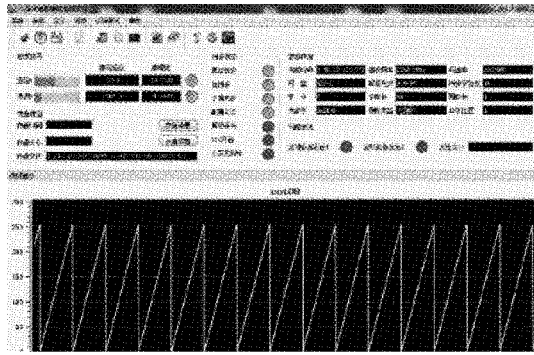


图 8 遥测接收机参数配置界面

据无丢包和误码。室外进行距离测试,将发射机放在高度 50 m 的空中,接收机距离 20 km 处开始接收数据,经解析后验证发射数据正确,符合弹载遥测发射机的性能要求。

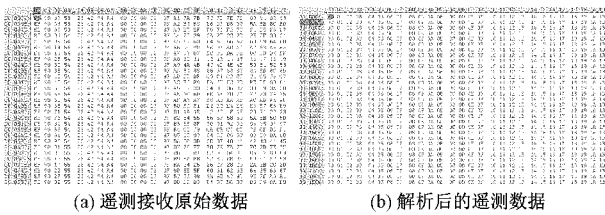


图 9 遥测数据和解析后的数据

4 结 论

本文利用 ARM+FPGA 和 AD9364 的平台设计了一款采用高频谱利用率 CPFSK 调制方式的零中频遥测发射机,解决了弹载遥测通信系统中频谱利用率低、设备可靠性差、体积大、设计复杂等问题。弹载遥测系统经过采集处理编码后的数据在 FPGA 内部实现组帧处理,采用查找表的方式实现 CPFSK 的调制方式,降低了 CPFSK 调制的复杂度、减小了 FPGA 内部的逻辑资源;采用 0.715 调制指数提高了发射能量效率;射频部分采用单一芯片 AD9364,利用 ARM 对其寄存器进行配置,实现基带信号直接上变频到发射频点。数据接口时序采用 XILINX 公司提供的原语进行设计,简化设计难度,提高了代码逻辑执行率。

为了验证发射机通信的正确性,对其进行了仿真验证、频谱分析和实际通信测试,测试结果表明,所设计的弹载遥测发射机满足设计指标,并且具有体积小、可靠性高、频谱利用率高等特点,通信距离远大于 20 km,不仅可以应用在弹载遥测系统,也可以运用于航天遥测系统。

虽然本文搭建的遥测系统具有较高的频谱利用率、体积小等特点,但遥测数据的码速率为 2 Mbit/s,不能满足现阶段高码速率的遥测需求,因而本文在后期工作需要增加调制前 TPC 编码技术,来满足高码速率的遥测需求。

参考文献

[1] 马文超,涂卫军,李科连,等.弹载遥测系统总体关键技

术的研究与应用[J].遥测遥控,2021,42(6):78-83.
 [2] 郭凯.航天遥测技术现状及发展思考[J].遥测遥控,2015,36(5):7-15.
 [3] 栾东海,肖慧敏,王庆博.基于 AD9364 的小型化航空遥测系统设计[J].遥测遥控,2018,39(5):33-36,45.
 [4] 陈长龙,王竹刚.通用零中频构架的 CPM 射频调制系统的设计[J].微电子学与计算机,2020,37(12):12-16.
 [5] MAYER K S, MÜLLER C, DE CASTRO F C C, et al. A new CPFSK demodulation approach for software defined radio [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2019, 28(14): 14.
 [6] 廖海华,王晖,张胜利,等.基于 GNU Radio 的多径信道测量系统设计[J].电子测量技术,2020,43(7):148-152.
 [7] RAVEENDRA K R, GABRANI G. Continuous phase frequency shift keying(CPFSK)[J]. IETE Journal of Education, 2015, 35(1-2): 23-34.
 [8] 罗霄,薛亚洲,张乐.一种无人机飞控计算机硬件平台的设计实现[J].电子测量技术,2021,44(1):50-54.
 [9] 侯越涛.数字调相信号识别与参数估计技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.
 [10] 杜勇.数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现—XILINX/VHDL 版[M].北京:电子工业出版社,2017.
 [11] RAMIREZ-PEREZ A, PARRA-MICHEL R, RODRIGUEZ-GARCIA A, et al. A new single-and multi-CPM transmitter [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(5): 716-726.
 [12] 孙晔,尹立言,向新. MSK 信号数字化调制解调的工程实现方法 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(4): 130-134.
 [13] 唐焯. 宽带卫星通信系统中 CPFSK 调制解调技术研究及实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.
 [14] 李超杰,马游春,赵阳,等.基于 AD9364 的弹载小型遥测发射系统设计[J].电子测量技术,2021,44(12):133-138.
 [15] 朱璠.基于 AD9364 的数字通信系统设计与实现[D].南京:南京理工大学,2019.
 [16] 全维超,周殊伦,鲍中华,等.遥测图像采集装置软件的设计与实现[J].国外电子测量技术,2021,40(8):100-104.
 [17] 王娜,金磊.高动态低信噪比 CPFSK 信号快速检测方法[J].现代雷达,2021,43(5):9-15.

作者简介

马游春(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为微测试计量技术及仪器、光纤光栅传感技术。

E-mail:798965939@qq.com

李超杰,硕士研究生,主要研究方向为微测试计量技术及仪器、遥测通信技术。

E-mail:2959516520@qq.com